

Concentración gravimétrica de menas auríferas

Octavio Hinojosa Carrasco

Laboratorio de Concentración de Minerales
Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales; Universidad Técnica de Oruro
octahinojosacarrasco@hotmail.com

Resumen

El beneficio de menas auríferas y de metales preciosos en general asigna requerimientos específicos a la práctica de la concentración: las causas son las propiedades, físicas geoquímicas o mineralógicas del oro. Algunas de estas propiedades tienen que ver con la granulometría de ocurrencia y forma de las partículas de oro, grado de liberación y tipos de asociación con otras especies minerales.

Los minerales básicos que componen la mena definen el esquema de procesamiento. La caracterización mineralógica, química y metalúrgica es una etapa previa al estudio de concentración, cuyo desarrollo es esencial para obtener la mayor recuperación de oro.

En este artículo, se efectúan los análisis y las consideraciones de los aspectos más importantes que se toman en cuenta en las diferentes técnicas de beneficio, estas técnicas son: la concentración gravimétrica, la amalgamación, la concentración centrífuga y la flotación, consideraciones que toman en cuenta, especialmente, información proveniente de la experiencia al tratar menas auríferas con características mineralógicas diferentes y, por supuesto, por diferentes técnicas.

También se muestran algunos flujogramas típicos para tratar menas auríferas de origen primario y menas de origen aluvial. Finalmente, se muestran algunos casos de estudio.

Palabras clave: concentración gravimétrica, amalgamación, concentración centrífuga, flotación, flujogramas.

Gravimetric concentration of ores of gold

Abstract

The benefit of gold ores and precious metals generally assigns specific requirements to the practice of concentration: the causes are physical and geochemical properties or mineralogical properties of gold. Some of these properties are related to the granulometry of occurrence and shape of gold particles, rate of release and association with other types of mineral species.

The basic minerals that compound the ore define the processing scheme. The mineralogical, chemical and metallurgical characterization is a preliminary step to the study of concentration, whose development is essential to get the most gold recovery.

This article analyzes and considerate the most important aspects taken into account in the various techniques of benefit, these techniques are: gravimetric concentration, amalgamation, centrifugal concentration and flotation, considerations that take into account especially information from experience in dealing with different mineralogical gold ore characteristics and different techniques.

The article also shows some typical flowcharts to treat primary source auriferous ores and ores of alluvial origin. Finally, some case studies are related.

Keywords: Gravimetric concentration, amalgamation, centrifugal concentration, flotation, flowcharts.

Concentração gravimétrica de minerais auríferos

Resumo

O benefício dos minerais de ouro e outros metais preciosos geralmente atribuem especificações específicas para a prática da concentração: as causas são as propriedades físicas e geoquímicas ou mineralógicas do ouro. Algumas destas propriedades são relacionadas com a ocorrência e a forma das partículas de ouro, taxa de libertação e tipos de associação com outros tipos de espécies minerais.

Os minerais básicos que compõem o minério definem o esquema de processamento. A caracterização mineralógica, química e metalúrgica é um passo preliminar ao estudo da concentração, cujo desenvolvimento é essencial para obter a maior recuperação de ouro.

Neste artigo são feitas as análises e considerações dos aspectos mais importantes tomados em consideração nas várias técnicas de benefício, estas técnicas são: concentração gravimétrica, amalgamação, concentração centrífuga e flotação, considerações que levam em conta especialmente as informações obtidas a partir da experiência no tratamento de minerais de ouro com propriedades mineralógicas diferentes e mediante técnicas diferentes.

Alguns fluxogramas típicos para tratar minerais auríferos de origem primário e minerais de origem aluvial são mostrados. Finalmente, alguns casos de estudo são apresentados.

Palavras chave: Concentração gravimétrica, amalgamação, concentração centrífuga, flotação, fluxogramas.

1. Generalidades

El beneficio de materias primas de metales preciosos impone exigencias especiales a la técnica de concentración; las causas son las propiedades físicas, geoquímicas o mineralógicas del oro. El oro se encuentra, por lo general, en yacimientos primarios con tenores de 100 - 200 g/t como máximo y de 1 - 2 g/t como mínimo; el límite inferior representa el cut-off de los yacimientos económicamente explotables; yacimientos sedimentarios tienen contenidos metálicos entre 0,2 y 20 - 50 g/t, aproximadamente. De acuerdo a esto, los factores de enriquecimiento en el beneficio tienen que ser elevados, al mismo tiempo se tienen que explotar y beneficiar, en función de su contenido, cantidades convenientes de mineral bruto para cubrir los costos de explotación y de beneficio.

De acuerdo a la caracterización mineralógica de las menas auríferas, el proceso de concentración gravimétrica es solo una posibilidad de aplicación a ellas. Los minerales básicos que componen la mena definen el esquema de procesamiento. La caracterización mineralógica, química y metalúrgica es una etapa previa al estudio de concentración, cuyo desarrollo es esencial para obtener la mayor recuperación de oro.

La concentración de menas auríferas se ve afectada, por contextos como:

- Granulometría de ocurrencia y forma de las partículas de oro.
- Liberación del oro y tipos de asociaciones con otras especies mineralógicas, tanto de ganga como de elementos de valor constituidos en granos mixtos.
- Presencia de oro en menas complejas, incluso presencia de oro en la red cristalina de algunos sulfuros metálicos, como se puede observar en la figura 1.

- El elevado peso específico del oro (19,32 g/cc) hace que este metal, aunque esté en tamaños muy pequeños, pueda ser separado de su ganga, generalmente cuarzosa de peso específico mucho más bajo (2,65 g/cc), por medio de la concentración gravimétrica desde pulpas acuosas.
- Cuando se presenta oro libre, grueso y de superficie limpia, hace fácil la amalgamación con mercurio y su recuperación en forma de amalgama.
- Cuando el oro se encuentra asociado a sulfuros metálicos (como hierro, cobre, plomo y zinc); o se encuentra asociado a ganga cuarzosa en forma fina y también como telururos, el proceso de concentración más indicado es la flotación.
- Cuando el oro se encuentra con bajo contenido y al estado de partículas finas asociadas a ganga cuarzosa, entonces, el proceso aconsejable es la cianuración como método de extracción por disolución del oro, siempre que no intervengan compuestos extraños consumidores de cianuro.
- Cuando la asociación del oro con sulfuros metálicos es tan fina que técnicamente sea imposible separarlos con una molienda fina, en tal caso el proceso de flotación seguido de cianuración de los concentrados directamente, o previa tostación de ellos, puede ser una solución.
- También se puede presentar el caso de menas en las que el oro se encuentra en parte libre y en parte finamente diseminado en la ganga; en tal caso, es recomendable un proceso combinado de flotación-cianuración. Por otra parte, si el oro libre está en tamaños relativamente gruesos, que permitan su recuperación por concentración gravitacional, se realiza un procesamiento combinado de concentración gravitacional-cianuración.
- Menas auríferas consideradas refractarias son aquellas en las que el oro está asociado o incluido en sulfuros de

hierro, o en sulfoarseniuros o arseniatos, el proceso de lixiviación ácida a presión en autoclaves previo a la cianuración es posible realizar con alta eficiencia en la recuperación del oro.



Figura 1. Asociación de oro en minerales sulfurosos.

2. Sistemas de concentración

Existen muchos métodos de concentración, métodos que tienen que ver con la mineralogía de la mena. Los métodos de separación que se tocarán en este artículo son: concentración por amalgamación, flotación, concentración centrífuga y concentración gravimétrica.

2.1. Separación o concentración por amalgamación

Es uno de los procesos más antiguos empleados en la recuperación de oro directamente de la mena, o desde concentrados obtenidos por concentración gravimétrica.

El proceso de separación consiste en extraer oro y plata por medio de su unión con mercurio metálico, formando una amalgama, la cual es sometida a destilación recuperando el mercurio en la fase gas, el oro y la plata como metal doré. El proceso es aplicable a partículas de oro grueso libre y de superficie limpia.

Hoy en día, la amalgamación de menas ha disminuido gradualmente por los problemas que ocasiona el uso del mercurio a la salud y por razones medioambientales; el proceso es casi obsoleto en los países desarrollados, pero en los países en vías de desarrollo todavía se practica, principalmente cuando se trata de concentrados gravimétricos ya que tiene la ventaja de ser un proceso relativamente simple, de bajo costo y eficaz.

En el proceso de amalgamación, el oro se disuelve mínimamente en el mercurio. La amalgama contiene generalmente partículas de oro superficialmente aleadas con el mercurio y ligadas entre sí por el mismo. En principio, todo el oro libre y limpio (p. ej. no cubierto por óxidos de hierro) se amalgama. Sin embargo, frecuentemente el mineral bruto puede contener ciertos minerales acompañantes y/o impurezas con efectos negativos para el proceso de amalgamación. Algunos de tales problemas se describen a continuación:

- Los sulfuros de arsénico, antimonio y bismuto reaccionan con el mercurio, produciendo una pérdida significativa del mineral precioso y mercurio. En un ambiente oxidante (p.ej. con aguas ácidas de mina), también la pirrotina y en menor grado la pirita y calcopirita pueden tener un efecto negativo sobre la amalgamación.
- La baritina, el talco, la esteatita y otros silicatos hidratados de magnesio y aluminio también podrían interrumpir el proceso e incrementar las pérdidas de oro y mercurio.
- Los lubricantes y las grasas son extremadamente problemáticos, porque se fijan al mercurio y tienden a atrapar sulfuros, talco, arcillas y otros minerales. Como resultado, el mercurio es cubierto por una película de partículas sólidas finas. Adicionalmente, la presencia de aceites lubricantes o grasas causan la flotación del oro, el cual es alejado del contacto con el mercurio. Tales factores, naturalmente bajan la recuperación del metal precioso en un proceso de amalgamación.
- Tanto el aluminio o el cobre metálico de los detonadores o cables eléctricos, como el plomo metálico (en forma de perdigones o balas de cazador en la minería aluvial) y el zinc de baterías, pueden amalgamarse, consumir y ensuciar el mercurio. Las amalgamas de estos metales frecuentemente se dispersan en forma de partículas finísimas bajo condiciones oxidantes.
- Las aguas ácidas de mina, frecuentemente utilizadas como agua de procesamiento, también tienen efectos dañinos para la amalgamación (por la oxidación de sulfuros). La adición dosificada de cal neutraliza parcialmente dichos efectos.

2.1.1. Etapas del proceso de amalgamación

Durante la amalgamación se cuentan con varias etapas necesarias e importantes para la práctica de esta técnica:

- a. **Preparación**, en esta etapa se realizan los cálculos preliminares de la cantidad de mercurio y reactivos que deben ser añadidos; también se define el tipo o reactor que se usará para la práctica.
- b. **Amalgamación**, en esta etapa se produce la amalgamación propiamente dicha; es decir, el oro se mezcla con el mercurio y se forma la amalgama.
- c. **Elutriación**, consiste en separar la amalgama formada más el mercurio residual de la ganga aprovechando la enorme diferencia de pesos específicos que existe entre el mercurio, la amalgama y las colas. Esta operación se puede

realizar usando una chúa manual o una chúa mecánica que son ideales para esta operación. En esta etapa, lamentablemente, se producen las mayores pérdidas de mercurio, principalmente cuando el mercurio se ha atomizado.

- d. **Filtración**, la mezcla de amalgama más el mercurio residual es filtrada empleando como medio filtrante una tela de tejido tupido como, gamuza, badana, etc. Esta operación permite obtener el mercurio y la amalgama de oro sólido con 30 a 40% de oro y/o plata, este producto suele llamarse también pella.
- e. **Destilación**, la separación del mercurio de la amalgama se hace por destilación en retorta a temperaturas superiores a 350 °C. De esta operación se obtiene el oro esponja y se recupera el mercurio que puede recircularse al proceso.
- f. **Copelación**, el oro esponja es convertido en una masa compacta, botón de oro, por el proceso de copelación, empleando para ello hornos de copelación y temperaturas de alrededor de 1.000 °C.

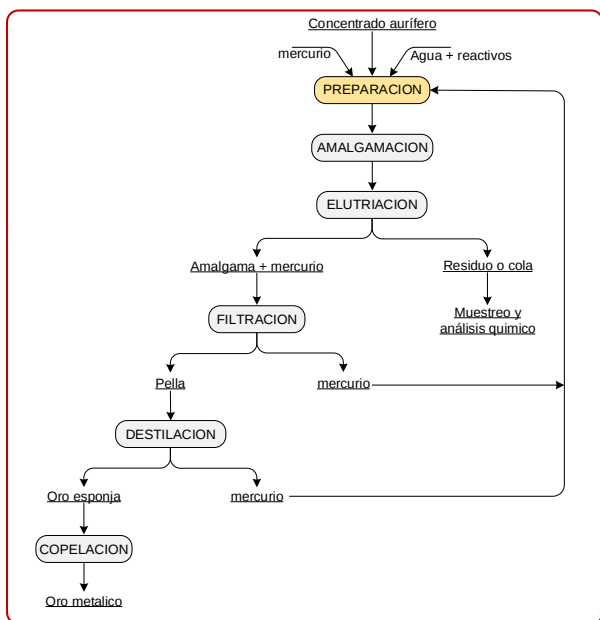


Figura 2.- Etapas del proceso de amalgamación.

2.1.2. Factores negativos que influyen en la amalgamación

Los resultados obtenidos en la amalgamación son insatisfactorios cuando intervienen en el proceso factores negativos de diferente índole que se especifican seguidamente:

- Falta de contacto adecuado entre el oro y el mercurio.
- Oro demasiado fino de comportamiento coloidal o cuando se presenta en laminillas muy delgadas que sobrenadan sin ponerse en contacto con el mercurio.
- Cuando el oro se encuentra como teluro.

- Oro enclavado en sulfuros; p.e., pirita aurífera.
- La superficie del oro está cubierta por una película de materias extrañas.
- El mercurio es impuro.
- Oro que se pierde como amalgama.
- Mercurio con apariencia de harina (floured mercury).
- Pulpa contaminada con grasa, aceite, talco, azufre, etc.
- Presencia de materiales arcillosos.

2.1.3. Pérdidas de oro en la amalgamación

Las pérdidas de oro en el proceso de amalgamación obedecen a los siguientes factores:

- El oro está enclavado en la ganga por falta de molienda adecuada para su liberación.
- El metal noble está revestido con herrumbre o con una película de cualquier sustancia extraña que evita el contacto con el mercurio.
- Las partículas muy finas de oro flotan y no toman contacto con el mercurio.
- El mercurio "cansado" o harinoso es incapaz de atacar al oro adecuadamente, o es tan fino, que se pierde en las colas y puede llevar oro en solución.
- Los compuestos de oro tales como los teluros no pueden ser recuperados en las máquinas de concentración, excepto cuando están finamente molidos.

2.1.4. Pérdidas de mercurio

La pérdida de mercurio es aproximadamente de diez gramos por tonelada de mena tratada, siempre y cuando se tengan los cuidados necesarios para el trabajo de amalgamación, de otra manera las pérdidas son mayores.

Los factores que ocasionan las pérdidas de mercurio son los siguientes:

- El mercurio forma amalgama con cobre o plomo, la cual es muy liviana y consecuentemente, sometida a pérdidas.
- La falta de cuidado en el manipuleo puede ocasionar en una u otra forma pérdidas mecánicas.
- La división del mercurio en finos glóbulos es la fuente más importante de pérdidas, en razón de que debido a su finura escapa de las trampas para salir junto con las colas y concentrados.
- Cuando se destila el mercurio un 0,1% o más es retenido por el residuo de la retorta que luego se pierde en la fundición; posiblemente escapa también una pequeña cantidad al aire.
- La evaporación del mercurio a la temperatura ordinaria es una fuente apreciable de pérdida.
- Bajo ciertas condiciones puede haber también una pequeña pérdida química. Así, el sulfato de cobre en el agua de batería puede ser descompuesto por el mercurio,

formando sulfato de mercurio soluble y amalgama de cobre. La pérdida química más grande ocurre en la amalgamación en lavador de oro.

2.2. Concentración por flotación

Entre los métodos convencionales de tratamiento de menas auríferas se tienen la concentración gravimétrica y la lixiviación por cianuración. Sin embargo, cada uno de estos procesos tiene sus propias dificultades; pérdidas de oro fino en concentración gravimétrica y conocimientos técnicos para el manejo adecuado del cianuro en la lixiviación.

En el caso particular de la concentración gravimétrica, el principal problema es la recuperación de partículas finas de oro que irremediablemente son arrastradas a las colas, inclusive partículas relativamente gruesas que tienen formas especiales favorecen a que sean arrastradas a las colas. De una manera general, se debe indicar que tomando las precauciones necesarias y los equipos apropiados, podrían ser recuperables partículas por encima de 75 micrones; empero, cuando no se tiene el cuidado preciso al tratar materiales que contengan oro fino y cuando tampoco se cuenta con los equipos adecuados, las pérdidas que se producen llegan a mayores rangos de fracciones granulométricas y que fácilmente pueden ser de hasta 300 micrones.

La flotación es otra buena alternativa para concentrar el oro fino cuando este se encuentra libre en la muestra o acompañado de sulfuros. Este proceso, puede resultar en el presente una posibilidad real para mejorar los índices metalúrgicos, puesto que las pérdidas de oro fino son realmente considerables cuando se usan medios gravimétricos y el uso de la cianuración no es nada atractivo en muchos lugares, especialmente por el aspecto ambiental.

La flotación se usa bastante en la recuperación de oro, sin embargo, los objetivos y el modo de aplicación son muy variables y dependen del tipo de mineral, de las asociaciones de oro, otros valores metálicos, consideraciones de mercado y requerimientos ambientales.

La mineralogía del mineral y las asociaciones de oro son fundamentales en la recuperación de oro. El uso de la flotación, en la concentración de oro, se rige por la mineralogía del oro y de la mena en cuestión. Los factores fundamentales son el tamaño del mineral/oro, tamaño de liberación, asociación del oro y tipo de minerales de la ganga y otros minerales valiosos.

Los reactivos que se emplean para el tratamiento de menas auríferas por flotación son, de una manera general, los mismos que habitualmente se utilizan en el tratamiento de menas sulfurosas, especialmente los xantatos como colector principal.

2.2.1. Factores que influyen en la flotación de oro

Los factores que influyen en la recuperación del oro son:

Liberación, el principal requerimiento mineralógico para la flotación del oro es que esté liberado; es decir, como partículas de oro libre o que forme parte de las partículas que son flotables. Esta segunda condición es la que usualmente se requiere para la recuperación del oro que se encuentra en la superficie de los minerales sulfurosos. Si son óxidos y/o silicatos los que forman parte del mineral aurífero, entonces la flotabilidad del oro es más baja y depende sobre todo de sus respectivas áreas de superficie de hidrofobicidad.

Recubrimiento (capas), la flotabilidad de oro libre depende de las condiciones de exposición de superficie. Si por ejemplo, una capa de sal de metal hidrofílica ha sido precipitada en la superficie del oro, reduce la superficie total hidrofóbica y consecuentemente reduce la recuperación del oro. Estos precipitados comúnmente contienen óxidos de hierro (Fe^{+3}) o hidróxidos, los cuales se forman debido a que ambos minerales contienen hierro o la pérdida de hierro en la molienda comúnmente entre 0,5 a 1 kg de Fe/t de mineral. En depósitos antiguos de colas, de varias décadas, se producen disoluciones de minerales, por tanto tiene lugar la precipitación, resultando la formación de capas de sales de Ca, Mg, Mn, Al y Fe como óxidos o carbonatos.

Tamaño de partícula, el tamaño de partícula tiene un gran efecto en la recuperación del oro por flotación, por su alta densidad. La flotación es efectiva para partículas en el rango de 20-200 micrones. Partículas más finas influyen negativamente en la selectividad debido a la co-flotación de componentes ganga. En caso de flotar tamaños de partículas relativamente gruesas, como alternativa se puede reducir la alta densidad del oro aumentando la densidad de pulpa y trabajando por ejemplo a 35% sólidos, con esto se reduce la sedimentación de las partículas de oro. Pero para partículas mayores a 200 o 250 micrones de oro lo más recomendable es usar gravimetría y amalgamación.

2.3. Concentración centrífuga

La concentración gravimétrica de minerales auríferos se realiza utilizando diferentes equipos que actúan bajo la aceleración de la gravedad normal del campo gravitacional terrestre, en esas condiciones, cada equipo tiene limitaciones propias en cuanto al tamaño de partículas que se pueden procesar y en cuanto al rendimiento que se puede obtener en la recuperación de los elementos valiosos.

A tamaños finos, las fuerzas hidráulicas y de fricción rebasan a la de gravedad, por lo cual la eficiencia de separación de los concentradores gravimétricos disminuye drásticamente. Para superar esto, se han diseñado concentradores que intensifican las fuerzas gravitacionales para que la separación se lleve a cabo a un valor de varias veces la fuerza de gravedad G.

Con estos concentradores se han resuelto muchos de los problemas para la aplicación de la concentración gravimétrica en la recuperación de oro libre en circuitos de molienda; como son la recuperación de oro de tamaño fino (< 150 micras), el

balance de agua, la capacidad, el mantenimiento y el control de la operación de los concentradores en los circuitos.

Los concentradores gravimétricos de este tipo operan con un campo centrífugo de hasta 300 Gs. Su operación consiste en introducir pulpa hasta el fondo de un reactor cónico truncado invertido, el cual gira a una velocidad de 400 rpm, la pared del cono está acanalada, inyectándose agua en las canaletas para fluidizar las partículas presentes en ella, evitar su compactación y mejorar la eficiencia en la concentración de oro.

Los tipos de concentradores centrífugos más utilizados están basados en el mismo principio pero difieren en su diseño técnico. Desde el punto de vista de su modalidad de trabajo, los equipos de concentración gravimétrica por centrifugación se agrupan en tres tipos, estos son:

- Centrífugas de lecho sedimentado (centrífuga china y centrífuga Gekko).
- Centrífugas de lecho fluidizado (Knelson y Falcon).
- Centrífugas de lecho fluidizado pulsante (jig Kelsey y concentrador MGS).

Las centrífugas ofrecen buena seguridad contra robos y ahorran fuerza de trabajo significativamente (lo cual puede ser una desventaja en la pequeña minería). Con las centrífugas se pueden lograr altos radios de enriquecimiento, para la posibilidad de fundición directa, pero a menudo se necesita otro equipo más (p. ej. una mesa concentradora). En los circuitos de molienda, los concentradores centrífugos son utilizados efectivamente para recuperar el oro liberado.

Las ventajas que se atribuyen a esta nueva técnica de concentración son las siguientes:

- Buena recuperación, generalmente >70%.
- Elevada capacidad de tratamiento.
- Equipo muy compacto.
- Elevado radio de enriquecimiento.

A estas ventajas ya reconocidas, pueden añadirse otras que resulten de la aplicación específica a cada mena en particular, como por ejemplo menor consumo de agua, incorporación de reservas actualmente no incluidas a los programas de producción, menor impacto ambiental por no emplear reactivos ni tener emanaciones gaseosas de contaminantes, etc.

2.4. Concentración gravimétrica

El fundamento de la concentración gravimétrica es la diferencia de densidades entre los minerales a separar. En general, mientras mayor es la diferencia de densidad entre dos minerales, más efectiva es su separación; por ello el oro con elevada densidad, es fácilmente separable del cuarzo de baja densidad. Si parte de la ganga está aún ligada a las partículas de oro, disminuye su densidad específica, y por lo tanto pierde eficiencia la concentración.

El oro es tan bueno como el dinero y mientras más pronto alcance el mercado es mucho mejor. La recuperación previa por concentración gravimétrica, cuando es posible, tiene ventajas adicionales significativas, por ejemplo en un posterior tratamiento hidrometalúrgico la reducción del tamaño de la planta de cianuración, puesto que la planta evita el tiempo excesivo para la disolución de granos grandes de oro, recuperación de granos de oro encapsulados que pueden resistirse o retardar la disolución con cianuro, ahorro en el consumo de reactivos y poca pérdida de oro entre las soleras del molino.

Para la concentración gravimétrica del producto final de clasificación, se usan muchos mecanismos. Los equipos estacionarios incluyen: canaletas con rifles, conos y espirales. Entre los mecanismos móviles están: jigs y mesas concentradoras. El concentrado de gravimetría tiene que ser tratado adicionalmente, como regla, ya sea por amalgamación, fusión directa o cianuración intensiva. La concentración centrífuga se muestra como alternativa para el tratamiento de partículas finas.

Los equipos de concentración gravitacional más usados en el tratamiento de menas auríferas son los siguientes:

Tabla 1. Equipos y granulometría de separación.

Equipos	Granulometría de separación
Canaletas	+100# (0,15 mm)
Jigs	3# - 20# (7 – 0,85 mm)
Mesas	20#-200# (0,85 - 0,075 mm)
Espirales	6# - 200# (2 – 0,075 mm)
Conos	6# - 200# (2 – 0,075 mm)
Concentradores centrífugos	65# - 12 μ m (0,212-0,012 mm)

La mayoría de los equipos mencionados para la concentración gravitacional, han tenido cambios tecnológicos fundamentales que han permitido mejorar su rendimiento y otros han sido creados para el tratamiento masivo de menas auríferas, logrando separar partículas pesadas más finas y con capacidades que sobrepasan las 100 tph de mineral.

2.4.1. Procesamiento de menas primarias

Para recuperar la máxima cantidad de oro, la mena debe ser molida finamente a fin de liberar las partículas de oro para que la posterior etapa de separación tenga su efectividad, o en su defecto, emplear algún otro proceso de separación como una extracción química.

Se debe conocer en detalle la litología, características geológicas y composición mineralógica del depósito aurífero. La dureza, friabilidad del depósito, su distribución de oro y las consideraciones de costos son los parámetros fundamentales que determinan la selección del circuito óptimo de conminución.

Pueden ocurrir grandes variaciones en las propiedades de conminución de un depósito grande. Por tanto, es necesario efectuar ensayos con muchas muestras de mena a fin de diseñar una planta óptima de conminución. Si se desea seguridad y eficiencia en el diseño de la planta, las diferencias geológicas en un depósito no deben ser pronunciadas, pues ocasionarían costos más altos de muestreo y ensayos.

Cada mena tiene sus propias características del grado de liberación del oro. Pruebas y estudios de factibilidad deben definir el circuito de conminución óptimo que permita transportar adecuadamente la alimentación a la planta. Existen tres tipos básicos de circuitos de conminución:

- Circuito cerrado convencional en tres etapas, trituración y molienda en molinos de barras y bolas.
- Trituración primaria y molienda autógena.
- Trituración primaria con molino autógeno seguido de molienda fina en molino de bolas.

La mineralogía del oro determina el grado de molienda requerido para una adecuada liberación del oro y la recuperación de extracción óptima económica; el resto de las operaciones unitarias pasan por operaciones como clasificación, concentración y/o flotación, amalgamación o fusión, hasta la obtención del oro físico, típicamente el flujograma que se muestra en la figura 3.

2.4.2. Procesamiento de placeres auríferos

La recuperación de oro desde placeres auríferos ha sido el comienzo de la metalurgia realizada por medio de procesos gravitacionales empleando canaletas y jigs. Sin embargo, este proceso durante muchas décadas no ha alcanzado el desarrollo tecnológico de la flotación y la cianuración, como proceso de recuperación y extracción del oro desde yacimientos tipo vetiformes.

Sin embargo, hoy en día, se puede decir que ha habido un fuerte desarrollo de este proceso debido especialmente a los siguientes factores que han incentivado su desarrollo.

- Rápida escalada de los precios del oro en el mercado mundial.
- Aumento de la preocupación del medio ambiente, en el medio público y minero puesto que este proceso no es contaminante.
- Aumento creciente en los costos de reactivos y energía en los procesos de flotación y lixiviación.
- Desarrollo de nuevos equipos gravitacionales y al mejoramiento de los existentes, logrando así una mayor eficiencia en la recuperación de partícula de oro más fina y en especial a una mayor capacidad de tratamiento.

Los placeres auríferos se caracterizan por:

- Su bajo contenido de oro libre, lo que hace necesario una explotación a gran escala.

- Falta de una tecnología que asegure una buena eficiencia en la recuperación.

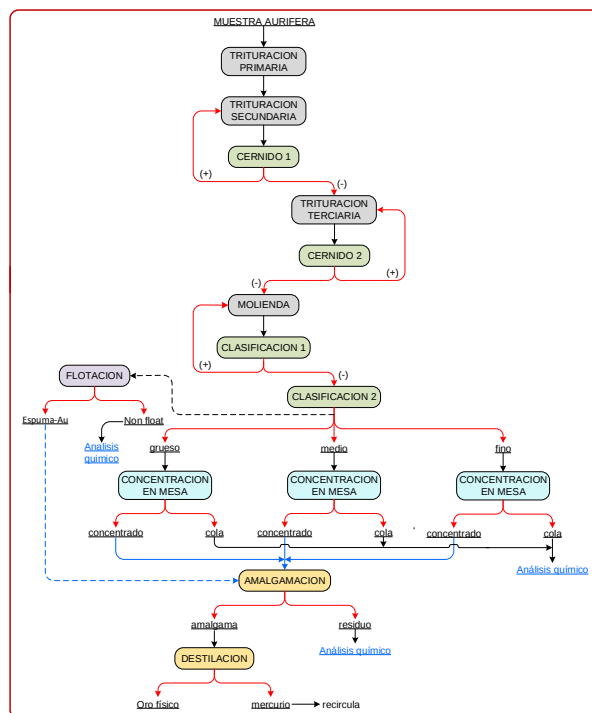


Figura 3. Flujograma para la determinación del oro físico recuperable a partir de menas de yacimiento primario.

2.4.3. Determinación del oro físico recuperable

Los circuitos de concentración gravimétrica son difíciles de evaluar por una serie de razones. Se requieren realizar pruebas con cantidades grandes de muestra para hacer estadísticamente válidos los resultados, especialmente si hay presencia de oro grueso libre.

Es posible seguir pasos establecidos para poder determinar con mucha aproximación, la presencia y cantidad de oro que se puede recuperar de una determinada mena proveniente de yacimiento primario. Esta determinación se realiza siguiendo los pasos que se muestran en el flujograma de la figura 3.

Este flujograma puede ser adaptado, con algunas modificaciones, a menas auríferas con diferentes características mineralógicas y físicas.

También se puede determinar el oro físico recuperable a partir de una mena de origen aluvial, con variantes en la primera parte del flujograma, como se puede ver en la figura 4.

Con este tipo de menas es aconsejable trabajar con una mayor cantidad de muestra por su bajo contenido de oro libre, de esta manera se pueden garantizar resultados más representativos.

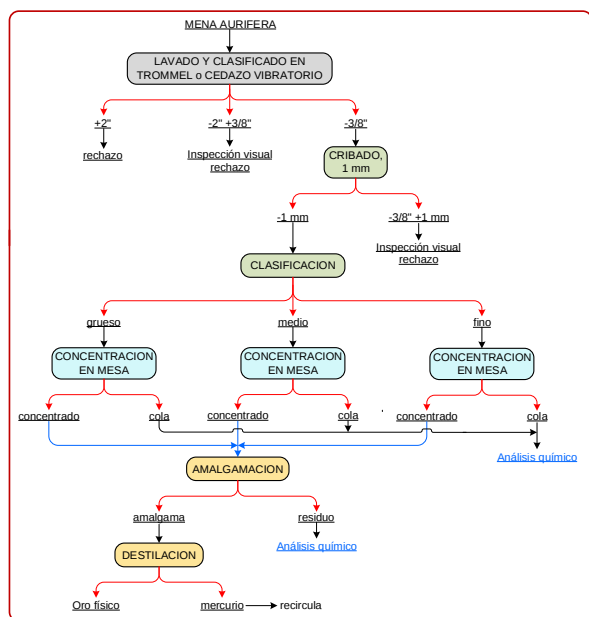


Figura 4.- Flujograma para la determinación del oro físico recuperable a partir de menas de origen aluvial.

2.4.4. Pérdidas de oro en el proceso de concentración

Las pérdidas generalmente se producen en las fracciones finas, donde el oro se encuentra distribuido. Las lamas están relacionadas directamente con el oro fino bajo la malla 400, por sobremolienda de menas de yacimiento primario u ocuyente en el depósito aluvial.

Generalmente las mayores pérdidas de oro fino se originan en el mal desagregado de las arcillas, las cuales atrapan al oro fino. Las pérdidas en las operaciones gravitacionales tienden por lo general a ser mínimas, teniendo en vista el efecto positivo de la operación de deslamado y clasificación previa.

Pérdidas comunes en las etapas de concentración son debidas a:

- Condiciones inadecuadas de operación, por las variaciones de la alimentación (heterogeneidad del depósito y metodología de extracción minera), que tienden a presentar grandes fluctuaciones como: leyes, granulometría, razón de alimentación, contenido de arcillas y otros. Estos aspectos exigen constantemente cambios en la operación, generalmente imposibles en la práctica.
- Frecuentes cambios en la densidad de pulpa alimentada a la etapa de concentración, produciendo caídas en la eficiencia de concentración.
- Deslamado ineficiente también produce bajas en la concentración, debido a la alteración de la viscosidad de la pulpa.

- Régimen altamente turbulento, hecho que ocurre en algunos jigs y canaletas disminuyendo la eficiencia en la concentración de oro fino.
- Factor forma, lo cual es común a las ocurrencias de oro en las formas de placoides y laminares, dificulta la sedimentación en la pulpa.
- Hidrofobicidad natural o contaminada de las partículas de oro fino que repercuten en la sedimentación (oro flotable).

3. Aplicaciones prácticas

Existen muchos flujogramas que se adecuan al tipo de mena que se va a tratar para la recuperación del oro físico, en esta oportunidad se limitará a presentar un flujograma para el tratamiento de menas de origen primario y otro para menas de origen secundario.

3.1. Flujograma típico de tratamiento para menas primarias

Este flujograma es completo y por tanto complejo, integra etapas de concentración gravitacional con etapas de flotación y cianuración.

Un jig trabaja en circuito cerrado con un clasificador y molino recuperando el oro grueso que es amalgamado en un tambor amalgamador.

Además tiene una etapa de flotación de las partículas finas de oro libre y asociado a pirita o pirrotina. Este concentrado es sometido a una etapa de tostación y cianuración por agitación, recuperando el oro fino.

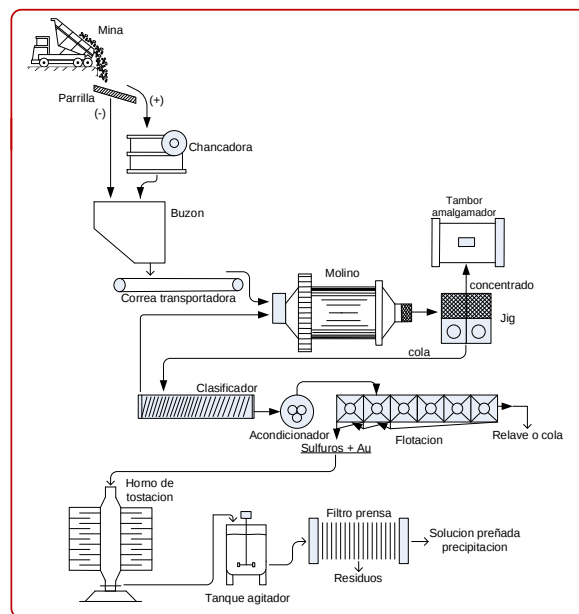


Figura 5. Flujograma alternativo para tratamiento de menas auríferas de origen primario.

3.2. Flujograma típico de tratamiento para menas aluviales

Este flujograma es típico en el tratamiento de este tipo de menas. La mayor parte de empresas dedicadas a esta actividad, con algunas variantes, siguen específicamente estos pasos y operaciones unitarias.

La capacidad de este diagrama corresponde aproximadamente a una razón de alimentación de 100 t/h.

- Este flujograma está compuesto de una etapa de lavado y desintegrado sobre cribas y trommel con agua a presión.
- La etapa de clasificación se realiza en trommel.
- La etapa de preconcentración se realiza en canaleta corta y larga además de jigs, recupera el oro grueso y fino.
- La etapa de limpieza o concentración se realiza en mesa de sacudimiento, obteniéndose un concentrado final de alta ley.
- Termina el proceso con la amalgamación del concentrado final junto con la fusión del oro al estado de metal doré.

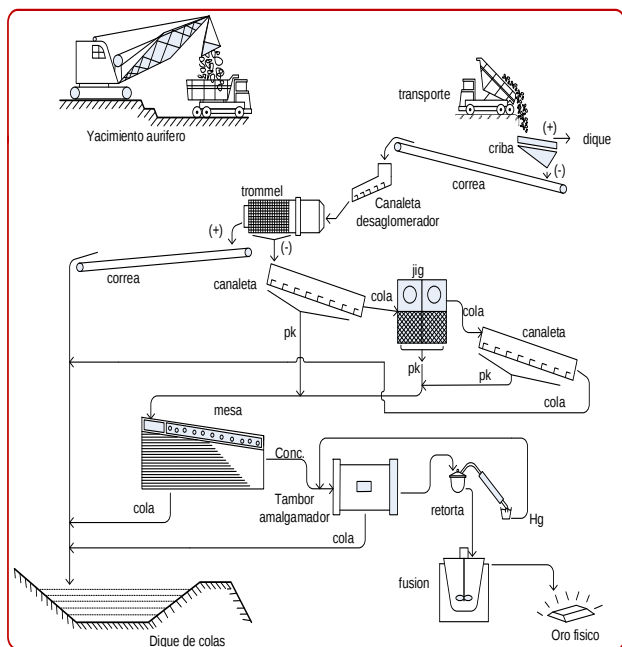


Figura 6. Flujograma alternativo para tratamiento de menas auríferas de origen aluvial.

4. Casos de estudio

A continuación se muestran resultados del tratamiento de menas auríferas provenientes de diferentes lugares.

4.1. Caso 1

Mineral aurífero proveniente del Departamento de Ayacucho, Perú, (dos muestras).

Características principales de la mena

Granulometría gruesa, 4 pulgadas. En el microscopio, previa reducción de tamaños y limpieza en chua, se observa oro fino poco abundante. Acompañantes: sulfuros en regular cantidad y abundante ganga silícea y en poca cantidad, óxidos de hierro.

Objetivo

Llevar a cabo la concentración usando 3 equipos de concentración gravimétrica, con fines comparativos, mesas vibrantes, espirales y chua mecánica y sugerir la mejor opción para su instalación industrial.

Experimentación

Las pruebas de concentración se llevaron a cabo siguiendo los flujogramas de las figuras 7 y 8; con fines comparativos las pruebas se llevaron a cabo en las mismas condiciones de operación, con los mismos tamaños de grano clasificados y la misma cantidad de pasos en cada equipo.

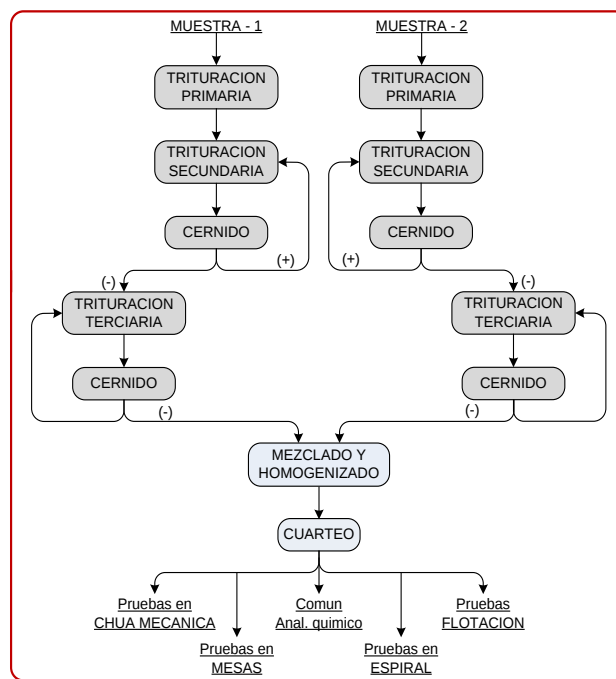


Figura 7. Flujograma de la etapa de preparación de la muestra aurífera para el tratamiento experimental con tres equipos gravimétricos a la mena aurífera proveniente del Perú.

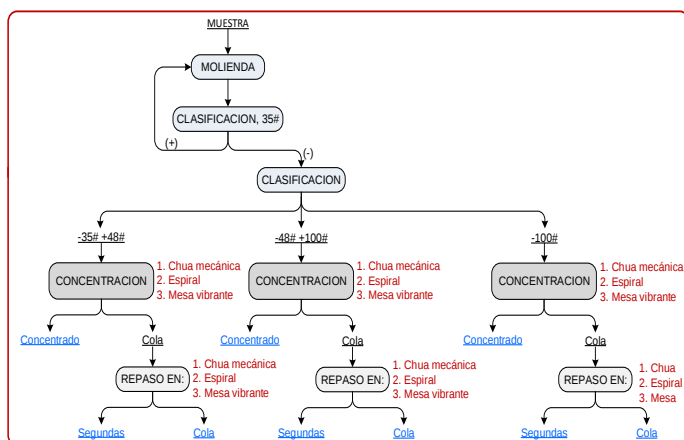


Figura 8.- Flujograma del tratamiento experimental realizado con tres equipos gravimétricos a la mena aurífera proveniente del Perú.

Resultados

La ley de cabeza de la muestra es de 4,57 g Au/t. Se realizaron balances metalúrgicos con cada fracción granulométrica y con

cada equipo, a continuación solo se presenta el resumen general de cada uno de los equipos usados.

Tabla 1. Balance metalúrgico final de las pruebas de concentración gravimétrica en chua mecánica y espiral.

Productos	%Peso	g Au/t	%Dist.	%Peso	g Au/t	%Dist.
Chua Mecánica				Espiral		
Concentrado	1,30	223,77	62,06	1,79	131,12	50,58
Segundas	11,28	6,49	15,64	11,28	8,21	20,32
Cola	87,42	1,19	22,30	86,93	1,74	29,10
Cabeza calculada	100,00	4,68	100,00	100,00	4,55	100,00
Cabeza ensayada		4,57			4,57	

Tabla 2. Balance metalúrgico de la prueba de concentración gravimétrica en mesa vibrante:

Productos	% Peso	Ley, g Au/t	% Distrib. Au
Concentrado	0,81	307,49	69,60
Segundas	1,24	46,56	16,14
Cola	97,95	0,52	14,26
Cabeza calculada	100,00	3,56	100,00
Cabeza ensayada		4,57	

Tabla 3. Balance metalúrgico de la prueba de flotación.

Condiciones de operación: Grado de molienda, 100% -65#; activador, CuSO₄; colector, Z-11; espumante, DF-1012.

Productos	%Peso	g Au/t	%Dist.	%Peso	g Au/t	%Dist.
Prueba 1				Prueba 2		
Concentrado	1,92	202,50	89,94	2,15	191,43	93,44
NF limpieza	5,45	4,41	5,56	5,45	2,25	2,78
Espuma rougher	7,37	56,02	95,50	7,60	55,77	96,22
Non Float	92,63	0,21	4,50	92,40	0,18	3,78
Cabeza calculada	100,00	4,32	100,00	100,00	4,40	100,00
Cabeza ensayada		4,57			4,57	

Tabla 4. Resumen de los índices metalúrgicos más importantes de las pruebas.

Opción	% Peso concentrado	Ley, g Au/t	% Recuperación
Chua Mecánica	1,30	223,77	62,06
Espiral	1,79	131,12	50,28
Mesas vibrantes	0,81	307,49	69,60
Flotación, prueba 1	1,92	202,50	89,94
Flotación, prueba 2	2,15	191,43	93,44

4.2. CASO 2:

Mineral aurífero proveniente del departamento de La Paz, Bolivia.

Características principales de la mena

Granulometría gruesa, 3 pulgadas; al microscopio, previa reducción de tamaños y limpieza en chua, se observa oro fino en regular cantidad. Acompañantes: sulfuros en poca cantidad, ganga silícea y óxidos de hierro y ganga arcillosa con tendencia formar laminas.

Antecedentes

Por gravimetría se logra una recuperación muy baja a pesar del buen contenido de oro en la alimentación.

Objetivo

Determinar las causas por las que la recuperación, por gravimetría, es baja. Sugerir, en base a los resultados de las pruebas experimentales, otro método de concentración para mejorar la recuperación de oro, que no sea lixiviación.

Experimentación: Ver figura 9.

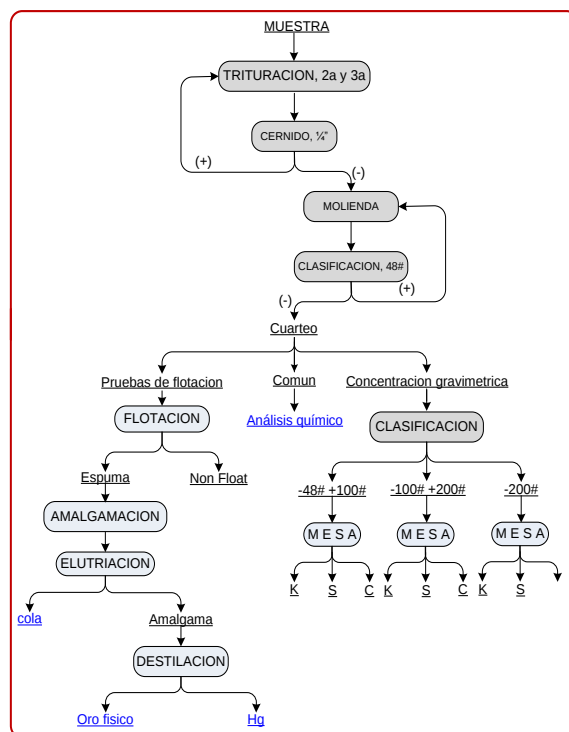
Resultados: La ley de cabeza de la muestra es de 15,20 g Au/t.

Tabla 5. Balance metalúrgico general.

Productos	% Peso	Ley, g Au/t	% Distrib. Au
Concentrado	3,06	174,70	35,49
Segundas	8,74	14,99	8,70
Cola	88,20	9,53	55,81
Cabeza calculada	100,00	15,06	100,00
Cabeza ensayada		15,20	

Observación

Efectivamente, la recuperación por concentración gravimétrica es baja; se ha podido comprobar que esta baja recuperación se debe a que el oro contenido en la muestra, que es fino, se encuentra en forma de hojas; este tipo de oro flota en la superficie del agua y por tanto la mayor parte es conducido a las colas de las mesas.

**Figura 9.** Flujograma de tratamiento de concentración gravimétrica, flotación y amalgamación a la mena aurífera proveniente de La Paz, Bolivia.**Tabla 6.** Balance metalúrgico de la concentración por flotación.

Productos	% Peso	Ley, g Au/t	% Distrib. Au
Espumas	1,76	803,60	90,72
NF - limpieza	5,57	5,19	1,85
Non Float	92,67	1,25	7,43
Cabeza calculada	100,00	15,59	100,00
Cabeza ensayada		15,20	

Tabla 7. Balance metalúrgico de la amalgamación a partir de la espumas de flotación.

Producto	Peso, g	Ley, g Au/t	Finos, g	% D. Etapa	% Dist. Total
Oro físico	0,08843		0,08843	58,64	53,20
Cola	187,56727	332,640	0,06237	41,36	37,52
Cabeza calc.	187,65570	803,600	0,15080	100,00	90,72

Observaciones:

La amalgamación de la espuma de flotación tampoco es práctica puesto que se logra una baja recuperación, esto se debe a la misma causa antes observada; los pequeños granos de oro en forma de hojas no penetran la superficie del mercurio para formar la amalgama.

Lo más adecuado para esta muestra es realizar la flotación y las espumas conducirlas a fusión, de esta manera se logrará una elevada recuperación final del oro.

4.3. Caso 3:

Mineral aurífero proveniente del departamento de Puno, Perú.

Características principales de la mena

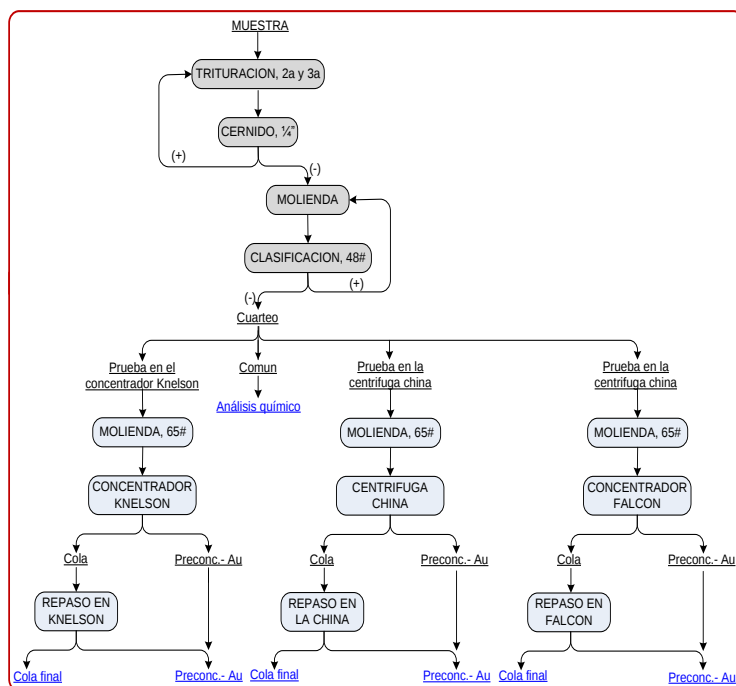
Granulometría gruesa, 3 pulgadas; al microscopio, previa reducción de tamaños y limpieza en chua, se observa escasa cantidad de oro fino. Acompañantes: sulfuros en poca cantidad; ganga silícea y óxidos de hierro.

Objetivo:

Determinar el grado de concentrado aurífero y rango de recuperación obtenido por preconcentración gravimétrica empleando, con fines comparativos, el concentrador Knelson, la centrífuga china y el concentrador Falcon.

Experimentación:

De acuerdo al flujograma de la figura 10.

**Figura 10.** Flujograma de tratamiento de preconcentración centrífuga, comparativo con tres equipos diferentes con la mena aurífera proveniente de Puno, Perú.**Resultados**

La ley de cabeza de la muestra es de 3,60 g Au/t.

Tabla 8. Balance metalúrgico de los resultados de pruebas en equipos centrífugos.

Productos	Concentrador Knelson			Centrífuga China			Concentrador Falcon		
	%Peso	g Au/t	%Dist.	%Peso	g Au/t	%Dist.	%Peso	g Au/t	%Dist.
Preconcentrado	7,15	46,00	81,58	9,33	25,42	68,02	6,21	52,22	93,00
Cola	92,85	0,80	18,42	90,67	1,23	31,98	93,79	0,62	16,68
Cabeza calculada	100,00	4,03	100,00	100,00	3,49	100,00	100,00	3,82	109,68
Cabeza ensayada		3,60			3,60			3,60	

Observaciones

Tratando de mantener las mismas condiciones de operación con cada uno de los equipos en lo que se refiere a la granulometría y cantidad de pasos por la maquina, se ve que

con el concentrador Falcon se logran los mejores índices metalúrgicos, mejor recuperación, mejor ley del preconcentrado y mejor radio de enriquecimiento.

Es pertinente hacer conocer que la fuerza centrífuga tanto en el concentrador Knelson y la centrífuga china es fija, por tanto las pruebas se realizaron en estas condiciones, 60 G's, mientras que en el concentrador Falcon se elevó la fuerza centrífuga hasta 150 G's, mostrando la importancia de esta variable en el tratamiento de partículas finas con concentradores centrífugos.

Referencias bibliográficas

1. ROQUE, D. *Recuperación de oro en yacimientos aluviales de Fátima y Tupara*. Oruro, Bolivia: Instituto de Investigaciones Minero Metalúrgicas, Informe Técnico N° 1187, 1993.
2. SALAS, C. A. "Apuntes de Cátedra MET 362", Carrera de Ingeniería Metalúrgica, Facultad Nacional de Ingeniería, Universidad Técnica de Oruro, Oruro, Bolivia. 1994
3. IGNACIO, G. A. *Evaluación y comparación de los equipos centrífugos y gravimétricos en la concentración de menas auríferas*. Oruro, Bolivia: Informe de Problemas Metalúrgicos MET 397, Carrera de Ingeniería Metalúrgica, Facultad Nacional de Ingeniería, Universidad Técnica de Oruro, 1992.
4. SALAS A. "Técnicas de preparación del mineral y métodos de concentración clásicas". En: *1er Encuentro Internacional sobre Metalurgia del oro*. CIUF-PUCP, 22-25 noviembre, Pontificia Universidad Católica del Perú, 1999.
5. LAPLANTE, A. R. "A comparative study of two centrifugal concentrator", En: *XXVII Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*. Ottawa, Ontario, Canadá, 1995.
6. SALAS, C. A. "Consideraciones para la concentración de oro aluvial del norte de La Paz", En: *I Conferencia Internacional de la Metalurgia de los Metales Preciosos-I, Conferencia Nacional sobre la Metalurgia del oro y la plata*. Gutiérrez-Beltrán-Jacinto Editores, Oruro, Bolivia, 1995.
7. SCHUBERT, H. *Aufbereitung fester Mineralischer Rohstoffe*. Band II, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Alemania, 1977.
8. LAPLANTE, A.R. "Case studies with the Falcon Concentrator". En: *XXVII Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*. Ottawa, Ontario, Canadá, 1995
9. MOLLINEDO, L., GUTIÉRREZ, G. "Cinética aleatoria para el diseño de procesos de concentración gravimétrica en planos inclinados de flujo laminar". En: *Congreso Nal. de Metalurgia y Ciencia de los Materiales*. Salas-Siles Editores, Oruro, Bolivia, 1994.
10. HINOJOSA, C. O. *Concentración gravimétrica en chua mecánica de las colas auríferas de la Cooperativa Huayna Potosí*. Oruro, Bolivia. Laboratorio Concentración de Minerales, Carrera de Ingeniería Metalúrgica, Facultad Nacional de Ingeniería, Universidad Técnica de Oruro Reporte de investigación N° 01/95, 1995.
11. SALAS, C. A., HINOJOSA, C. O., TEJERINA, J. "Concentración de oro fino en chuas mecánicas", En: *Simposio Internacional del Oro*, Lima, Perú, 1996.
12. HINOJOSA, C. O. "Concentración gravimétrica de menas auríferas". En: *Jornadas 3M*. Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Facultad Nacional de Ingeniería, Universidad Técnica de Oruro, Bolivia, 2016.